室内 CO_2 浓度、温湿度和光照变化对碰碰香挥发物释放量的影响

崔静娴[1]，刘慧[1,2*]，刘红[1,2]

（1. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院 环境生物学与生命保障技术研究所，北京 100191；2. 北京航空航天大学 空天生物技术与医学工程国际联合研究中心，北京 100191）

摘要：碰碰香（*Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus*）的芳香气味具有改善身心健康的作用，但其挥发物的释放易受到室内环境影响进而降低效果。为探究碰碰香挥发物对常见室内环境变化的响应，并为其高效稳定地应用于构建舒适的亲生物环境提供科学依据，该研究采用混合正交设计，使用动态顶空和气相色谱质谱联用技术测定了碰碰香挥发物对温度、湿度、CO_2 浓度及光照这 4 种常见室内环境因素的响应。结果表明：（1）在温度、湿度、CO_2 浓度和光照 4 个环境因素中，CO_2 浓度和温度对碰碰香植株挥发物释放量的影响较大，而湿度和光照的影响较弱。（2）正常光周期下培养的碰碰香，在夜晚无光照时，CO_2 浓度 500 $\mu mol\cdot mol^{-1}$、温度 25 ℃和湿度 60%的环境条件最适于碰碰香植株释放挥发物。此环境条件下碰碰香挥发物的释放总量为 86.23 $\mu g\cdot L^{-1}\cdot kg^{-1}$，具有改善身心健康的活性成分含量为 78.03 $\mu g\cdot L^{-1}\cdot kg^{-1}$。综上所述，应用碰碰香构建室内亲生物环境，维持或改善人员身心健康时，应主要注意控制 CO_2 浓度和温度相关的环境条件，从而充分高效地发挥碰碰香的园艺效益。

关键词：碰碰香，挥发性有机物，温度，相对湿度，二氧化碳浓度，光照条件，混合水平正交试验

中图分类号：Q948；S609.9　　**文献标识码：**A　　文章编号：

Effects of indoor CO_2 concentration, temperature, humidity and light condition on volatile organic compounds released by *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus*

CUI Jingxian[1], LIU Hui[1,2*], LIU Hong[1,2]

(1. *Institute of Environmental Biology and Life Support Technology, School of Biological Science and Medical Enginering, Beihang Univerrity*, Beijing 100191, China；2. *Internet Joint Research Center of Aerospace Biotechnology & Medical Engineering, Beihang University*, Beijing 100191, China)

Abstract: The aromatic odor of *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus* has been found to have the potential to improve physical and mental health of people in indoor environment, but the

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金（82001996）[Supported by National Natural Science Foundation of China（82001996）]。

作者简介：崔静娴（1996-），硕士研究生，主要研究方向为特殊环境园艺疗法，（E-mail）cuijingxian@buaa.edu.cn。

***通信作者：**刘慧，博士，副研究员，研究方向为特殊环境园艺疗法，（E-mail）liuhui87@buaa.edu.cn。

release of volatile organic compounds from plants is susceptible to indoor environmental changes and thus the stability of its effectiveness. The purpose of this study was to investigate the response of volatile organic compounds released by *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus* to common indoor environmental changes, and to provide a scientific basis for its efficient and sustainable application in building a comfortable pro-biotic environment to improve the physical and mental health of indoor personnel. Thus, the effects of four typical indoor environmental factors, such as air temperature, air relative humidity, CO_2 concentration and light condition, on the release of volatile organic compounds from *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus were* investigated in this study. And the dynamic headspace and gas chromatography-mass spectrometry techniques were used to analyze the volatile organic compounds in different indoor environments with an environmental control device based on mixed-level orthogonal array design. The results were as follows: (1) Among the four typical indoor environmental factors of air temperature, air relative humidity, CO_2 concentration and light condition, CO_2 concentration and air temperature had greater effects on the release of volatile organic compounds from *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus*, than air relative humidity and light. (2) For *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus* cultivated under normal photoperiod, an environmental condition with CO_2 concentration of 500 $\mu mol\cdot mol^{-1}$, air temperature of 25 ℃ and air relative humidity of 60% was most suitable for releasing volatile organic compounds from *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus* in the absence of light. Under this environmental condition, the total amount of volatile organic compounds released by *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus* was 86.23 $\mu g\cdot L^{-1}\cdot kg^{-1}$, and the content of biological active components with potentials for the positive intervention of physical and mental health was 78.03$\mu g\cdot L^{-1}\cdot kg^{-1}$。 In summary, the results suggested that when the aroma plant *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus* was used to build an indoor pro-biotic environment to maintain or improve the physical and mental health of people in indoor, the environmental conditions should be controlled properly, especially CO_2 concentration and air temperature, so as to fully and efficiently produce the positive health benefits from *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus*.

Key words: *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus*, volatile organic compounds, temperature, humidity, CO_2 concentration, light, mixed horizontal orthogonal test

药食同源的芳香植物碰碰香（*Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus*）是唇形科延命草属的多年生灌木状草本植物，原产自西南亚地区及非洲好望角（张玉晶等，2020），为花卉市场常见的小型香草盆栽，常用于装饰室内或工作环境(赵小珍等，2016)。植株茎叶不仅可以作为食用香料在炒菜或凉拌时提味，还可以泡茶、泡酒(张旋等，2019)。植株芳香浓郁，其香气已被证明可显著改善紧张焦虑情绪(荆小洁等，2020)。现代人类 80%的时间在室内度过，久处于室内的人们情绪和睡眠问题日益凸显(Mazlan & Abas, 2021)。近年来，新型冠状病毒（COVID-19）的隔离防控措施限制了户外活动，并使人们焦虑、抑郁的情绪分别增长了 16%和 28% (Rajkumar, 2020)。而将碰碰香应用于构建对身心健康有益的室内环境，是一种用于维护久居室内人群的生理心理健康的行之有效的方法。

然而，芳香植物挥发物（volatile organic compounds, VOCs）的合成与释放是一个受多种因素影响的复杂生理过程，与光周期、温湿度等影响生理状态的外界环境因素密切相关，许多植物VOCs释放在不同环境下存在较大差异。研究发现矮牵牛中的苯环类物质在夜间释放，而一些香气物质如异丁子香酚仅在白天释放，白玉兰鲜花在低温下仅释放几种挥发物，大多数萜烯类化合物为痕量或不释放（李莹莹，2012）。此外，高光强、高温或湿度增加在一定程度上会刺激植物释放VOCs (Holopainen & Gershenzon, 2010)，环境湿度增加可使赤松

和云杉释放的VOCs成分发生改变，且湿度增加与芳香物质α-蒎烯的释放呈显著正相关（李洪远等，2015）。然而，也有研究显示一些植物的VOCS释放对于高湿度并不敏感，甚至会受到抑制。大气中CO_2浓度对植物VOCs释放的影响可能因物种而异，目前尚未有统一观点，如高浓度的CO_2使花旗松VOCs释放量显著降低，而令洋葱的VOCs释放量显著升高（Jasoni et al., 2018）。因此，不同植物的VOCs释放对环境变化的响应存在较大差异，需进一步研究。

室内环境与通风方式、人员密度、季节更替等密切相关。常见的室内环境具有空间较小、光照强度低、CO_2浓度高等特点。教室内 CO_2浓度最低值为 573 μmol·mol^{-1}，最高值高达 4 991 μmol·mol^{-1}（姬长发等，2019）；室内平均居住温度在 19.78～31.18 ℃范围内，室内相对湿度季节性变化强，冬季最低，夏季最高，且与室内空气温度密切相关（Tamerius et al., 2013）。环境变化是碰碰香在实际室内应用中需要考虑的主要潜在影响因素，可能会通过影响碰碰香 VOCs 的释放，进而影响其对生理心理健康的干预效果。但以往尚未针对室内环境因素对碰碰香 VOCs 释放的影响展开系统的研究。本研究采用混合正交试验方法，探究温度、湿度、CO_2浓度及光照条件等室内主要环境因素对碰碰香植株 VOCs 释放的影响，旨在明确影响碰碰香植株 VOCs 释放的主要因素，进而提供其 VOCs 高效稳定释放的最佳环境条件，以便针对性地在日常室内工作和生活环境中使用碰碰香植株，充分发挥其应用价值。

1 材料与方法

1.1 实验材料及装置

供试植物：碰碰香 3 盆，泥炭土种植与圆形花盆中（直径 27 cm，高 18 cm），培养环境为碰碰香生长较适宜的环境：温度（25 ± 2） ℃、空气相对湿度（50 ± 10）%、光周期为 12 h 光照/12 h 黑暗（8:00 打开光源，20:00 关闭光源）。照明光源采用红白 LED 光源，光谱中红白光比例为 1:1，光强 120 μmol·m^{-2}·s^{-1}。培养碰碰香株高至 16～18 cm 时开展所有的实验处理。

1.2 常见室内环境的实验因素水平设计

经文献调研(王茜等，2019)，确定温度、湿度、光照条件、CO_2浓度为可能影响碰碰香的 VOCs 释放的典型室内环境因素。依据室内通风状态及人员密度，室内实地测量结合文献调研(Tamerius et al., 2013；姬长发等，2019)，确定变化范围为温度 20～30 ℃，湿度 40%～80%。CO_2浓度范围 500～4 500 μmol·mol^{-1}，光照强度为光照 20 μmol·m^{-2}·s^{-1} 或黑暗 0 μmol·m^{-2}·s^{-1}。各个环境因子的水平设置见表 1。

根据混合正交试验设计原理，选择相近的 L18.3.6.6.1 正交表，使用拟水平法进行正交试验设计(武凯等，2021)，测试顺序随机，每个处理平行 3 次，结果取平均值。

表 1 常见室内办公或居家环境的实验因素水平设置

Table 1 Experimental factor level design of typical indoor office or home environment

水平 Level	光照条件 Light condition	温度 Temperature (℃)	湿度 Humidity (%)	CO_2浓度 CO_2 concentration (μmol·mol^{-1})
1	光照 Light	20	40	500
2	黑暗 Dark	25	60	1 500
3		30	80	2 500
4				3 500
5				4 500

1.3 VOCs 采样方法

用于碰碰香 VOCs 采集的实验装置（图 1）上部为有机玻璃罩，在植物茎基部使用有机玻璃板和聚四氟乙烯薄膜将土壤上部的植株与下方的土壤隔开，用硅胶圈密封固定(Daussy & Staudt, 2020)，构成上方密封空间以避免土壤 VOCs 的干扰。采样时间为每日 9:00-16:00，采样前先将碰碰香放置在实验装置中，使用经过过滤的空气冲洗（4 L·min^{-1}）有机玻璃罩 10 min，以消除安装过程中残留的 VOCs。空气的过滤净化使用 GDX-101 和活性炭两种吸附管（Li et al., 2019），以避免外界空气中 VOCs 的干扰。

环境条件控制通过向装置内通入不同温度、湿度、CO_2 浓度的空气，以及控制外界光源的开闭来实现。使用温湿度控制器来控制温湿度，气体流量调节器控制装置内 CO_2 气体的浓度。当装置内 CO_2 传感器示数保持相对稳定不变 3 min 以上时，判定植株已适应了此环境条件，即此环境下碰碰香植株的光合作用强度已经达到稳定状态，继续稳定 30 min 后进行 VOCs 吸附采样(Daussy & Staudt, 2020)。在装置出气口接 Tenax-TA 吸附管，以 100 m L·min^{-1} 的恒定流量采样 30 min，重复 3 次。采样结束后，称量碰碰香植株地上部分鲜重质量，用于计算碰碰香植株单位鲜重生物量的 VOCs 释放量。

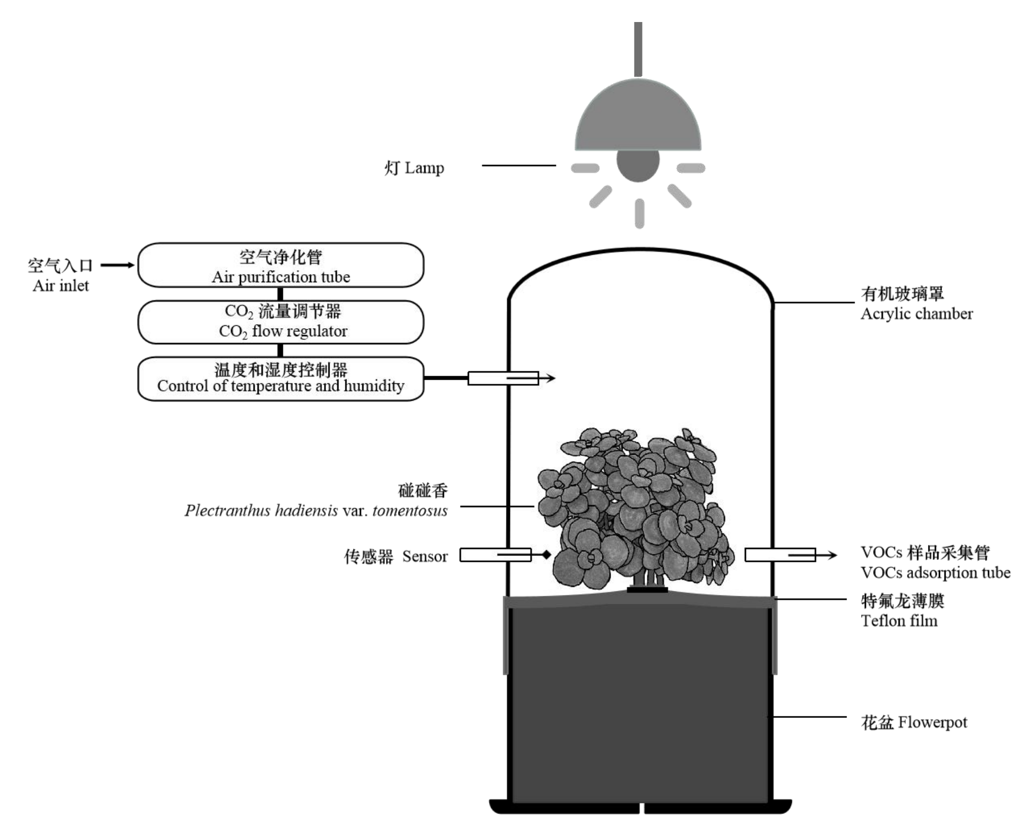


图 1 用于测量碰碰香 VOCs 释放的装置

Fig.1 Device for measuring VOCs released by *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus*

1.4 GC-MS 检测与 VOCs 成分分析

采集的样品使用热解析仪（TD-20，中国）进行热脱附，进行气相色谱质谱联用分析（QP2020 气质联用仪，日本）。具体条件为：HP-5MS 色谱柱（60 m × 0.25 mm × 0.25 µm），初始温度 50 ℃，保持 10 min，以 5 ℃·min^{-1} 速率程序升温到 250 ℃，保持 5 min；载气为高纯氦气（99.999 9%）。MS 离子源在 70 eV、200 ℃，全扫描模式下运行，质量扫描范围为 30 amu ~ 800 amu。通过 NIST 化合物数据库，具有保留指数或将质谱与已发表的数据进行比较来鉴定化合物。使用北京坛墨质检标准物质中心的混合 VOCs 作为标样并绘制标准曲线，进行现化合物的定量计算。

依据网络药理学方法(钟钰等，2019)，利用 TCMSP 中药系统药理学数据库

(http://tcmspw.com/tcmsp.php)、Pubchem 有机小分子生物活性数据库(https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/)，TGSC 香料信息数据库(http://www.thegoodscentscompany.com/)，预测筛选碰碰香 VOCs 中具有抗焦虑抑郁，镇静催眠等生理活性的成分。

1.5 统计分析

根据混合正交实验设计原理，计算极差 R 并按大小进行排序，筛选出最佳适用环境条件(武凯等，2021)，计算分析各环境因素的影响趋势：Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ分别为每个环境因素不同水平的实验值之和。K1-K4 分别是每个因素第 1-4 个水平的值，根据各个因素的 2 个、3 个或 4 个的水平值设置，分析该因素对试验指标的影响趋势。

2 结果与分析

2.1 碰碰香 VOCs 释放总量及其主要成分的变化

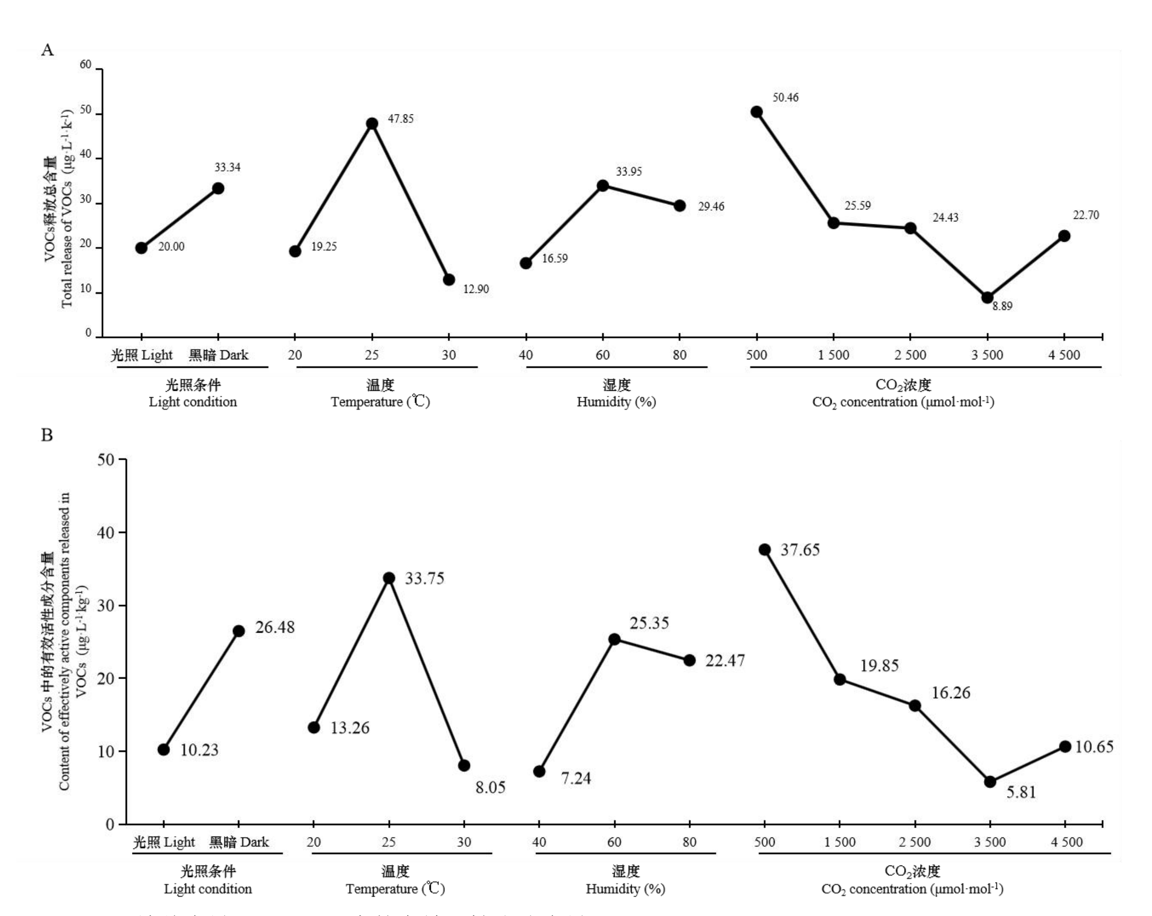
表 2 为不同环境组合下碰碰香植株 VOCs 释放总量的结果，光照（A）、温度（B）、湿度（C）和 CO_2 浓度（D）的极差 $R_D>R_B>R_C>R_A$，说明 CO_2 浓度对碰碰香 VOCs 释放总含量的影响最大，其次是温度因素、湿度，而是否有光照对 VOCs 释放的影响较小。各环境因素对 VOCs 释放总含量的影响趋势如图 2：A。黑暗条件下碰碰香 VOCs 释放量要高于有光照环境下。碰碰香 VOCs 的释放总量先随温度、湿度的升高而增加，但是当温湿度超过一定限度时，VOCs 释放总量会发生了明显的降低。随着 CO_2 浓度的升高，碰碰香 VOCs 的释放总量表现降低的趋势，释放量在 500 μmol·mol^{-1} CO_2 浓度下最高，3 500 μmol·mol^{-1} 时最低，4 500 μmol·mol^{-1} 处表现出明显的升高趋势，但仍低于 500 μmol·mol^{-1} 下 VOCs 的释放量。直观分析可以看出，促使碰碰香 VOCs 释放的较佳环境条件为 A2B2C2D1，即黑暗、温度 25 ℃、湿度 60%，CO_2 浓度 500 μmol·mol^{-1}，碰碰香 VOCs 释放总量可达到 86.23 μg·L^{-1}·kg^{-1}，即每千克碰碰香植物释放到每升空气中的挥发物质量为 86.23 μg。

不同环境条件下碰碰香植株释放的 VOCs 成分差异较大（表 3）。在黑暗条件下，大多数实验组 VOCs 中含量最多的物质均为 d-柠檬烯，且部分处理组的柠檬烯含量超过了 50%（组 2、组 4、组 5、组 17），推测可能在黑暗条件下碰碰香 VOCs 中 d-柠檬烯的合成与释放较为稳定。

表 2 不同环境对碰碰香 VOCs 释放总含量影响的正交试验结果

Table 2 Results of mixed horizontal orthogonal test on the total components in VOCs released by *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus*

处理 Treatment	A 光照条件 Light condition	B 温度 Temperature (℃)	C 湿度 Humidity (%)	D CO_2浓度 CO_2 concentration (μmol·mol^{-1})	VOCs 总含量 Total VOCs release（μg·L^{-1}·kg^{-1}）
1	光照 Light	20	40	500	8.10
2	黑暗 Dark	25	60	500	86.23
3	光照 Light	20	60	1 500	11.71
4	黑暗 Dark	25	80	1 500	58.84
5	黑暗 Dark	20	80	2 500	37.75
6	光照 Light	25	40	2 500	39.73
7	光照 Light	30	80	3 500	4.16
8	黑暗 Dark	30	40	3 500	10.34
9	光照 Light	30	60	4 500	7.79
10	黑暗 Dark	20	80	4 500	33.64
11	黑暗 Dark	30	80	500	37.15
12	光照 Light	30	40	1 500	6.22
13	黑暗 Dark	30	60	2 500	11.75
14	光照 Light	25	80	3 500	5.23
15	光照 Light	25	40	4 500	26.67
16	黑暗 Dark	20	40	2 500	8.48
17	黑暗 Dark	20	60	3 500	15.83
18	光照 Light	25	60	500	70.38
Ⅰ	179.98	115.52	99.54	201.86	Ⅰ+Ⅱ+Ⅲ+Ⅳ+Ⅴ=
Ⅱ	300.03	287.07	203.70	76.77	480.00
Ⅲ		77.41	176.77	97.71	
Ⅳ				35.56	
Ⅴ				68.10	
K1	20.00	19.25	16.59	50.46	
K2	33.34	47.85	33.95	25.59	
K3		12.90	29.46	24.43	
K4				8.89	
K5				22.70	
Max	33.34	47.85	33.95	50.46	
Min	20.00	12.90	16.59	8.89	
R	13.34	34.94	17.36	41.57	
因素主次 Primary and secondary factors	D>B>C>A				
最优方案 Optimal scheme	A1/A2	B2	C2	D1	



A. VOCs 释放总含量；**B.** VOCs 中的有效活性成分含量。

A. Total release of VOCs；**B.** Content of effectively active components released in VOCs.

图 2 各因水平对碰碰香植株 VOCs 释放量的影响趋势

Fig.2 Influence trend of each factor on the VOCs released by *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus*

2.2 碰碰香 VOCs 中有效活性成分含量的变化

利用相关数据库，结合文献(Zhang & Yao, 2019)预测筛选出抗焦虑抑郁或镇静催眠的有效活性成分，得到碰碰香 VOCs 中与身心健康相关的 41 种有效活性成分（表 4）。在筛选得到的有效活性成分中，多数为既可以缓解失眠症状亦可以缓解焦虑抑郁情绪的单萜类或倍半萜类物质，如含氧单萜烯（α-松油醇，芳樟醇等），单环单萜烯（d-柠檬烯，伞花烃等）等。

碰碰香 VOCs 中有效活性成分含量的变化与总含量变化趋势总体相似（表 5，图 2：B），黑暗条件下有效活性成分的释放量要高于有光照条件。各环境因素的极差 $R_D>R_B>R_C>R_A$，说明 CO_2 浓度对 VOCs 中的活性成分合成和释放影响最大。直观分析得出，在黑暗、温度 25 ℃、湿度 60%、CO_2 浓度 500 μmol·mol^{-1} 环境下，碰碰香植株释放的 VOCs 中有效活性成分含量最高，为 78.03 μg·L^{-1}·kg^{-1}。

表 3 不同环境条件下碰碰香植株释放的 VOCs 中含量前三的成分及其百分含量

Table 3 Components and percentages of the top three in VOCs released by *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus* under different environmental conditions

处理 Treatment	各组含量前三的成分及其百分含量 Percentages of the top three components in each group					
	化合物 Compound	百分含量 Percentage（%）	化合物 Compound	百分含量 Percentage（%）	化合物 Compound	百分含量 Percentage（%）
1	肉桂烯 Styrene	6.67	对伞花烃 *p*-Cymene	5.16	顺式-对-薄荷二烯醇 *p*-mentha-2,8-dien-1-ol	4.39
2	d-柠檬烯 *d*-Limonene	55.67	萜品油烯 Terpinolene	5.98	芳樟醇 Linalool	4.72
3	桧烯 Sabinene	9.21	2-乙基己醇 1-Hexanol, 2-ethyl-	8.36	*β*-蒎烯 *β*-Pinene	6.32
4	d-柠檬烯 *d*-Limonene	53.55	桧烯 Sabinene	6.39	*β*-蒎烯 *β*-Pinene	4.80
5	d-柠檬烯 *d*-Limonene	53.60	桧烯 Sabinene	7.41	4-蒈烯 4-Carene	6.60
6	正癸醛 Decanal	11.91	萜品油烯 Terpinolene	8.57	芳樟醇 Linalool	8.54
7	萜品油烯 Terpinolene	11.12	芳樟醇 Linalool	9.62	4-蒈烯 4-Carene	8.04
8	桉叶油醇 Eucalyptol	6.71	芳樟醇 Linalool	5.97	左旋乙酸冰片酯 (-)-Bornyl acetate	5.85
9	丁基癸醚 Butyl decyl ether	15.14	d-柠檬烯 *d*-Limonene	13.65	4-蒈烯 4-Carene	7.50
10	d-柠檬烯 *d*-Limonene	29.41	月桂酸 Dodecanoic acid	5.79	4-蒈烯 4-Carene	4.89
11	d-柠檬烯 *d*-Limonene	41.80	α-蒎烯 *α*-Pinene	5.45	桧烯 Sabinene	5.31
12	4-蒈烯 4-Carene	11.49	乙酸乙酯 Ethyl acetate	10.72	左旋乙酸冰片酯 (-)-Bornyl acetate	8.29
13	d-柠檬烯 *d*-Limonene	13.99	4-蒈烯 4-Carene	7.80	左旋乙酸冰片酯 (-)-Bornyl acetate	6.29
14	月桂酸 Dodecanoic acid	6.33	芳樟醇 Linalool	6.06	乙酸乙酯 Ethyl acetate	5.95
15	2,2,4-三甲基戊二醇异丁酯 2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiol diisobutyrate	21.95	月桂酸 Dodecanoic acid	5.68	反式-2,8-1-薄荷脑醇 *trans-p*-Mentha-2,8-dienol	3.81
16	d-柠檬烯 *d*-Limonene	11.49	4-蒈烯 4-Carene	8.98	2-乙基己醇 1-Hexanol, 2-ethyl-	7.25
17	d-柠檬烯 *d*-Limonene	57.29	桧烯 Sabinene	6.84	萜品油烯 Terpinolene	5.04
18	芳樟醇 Linalool	8.52	驱蛔萜 Ascaridole	6.84	柠檬烯 Limonene	5.85

表 4 应用网络药理学方法预测和筛选出碰碰香植株释放的 VOCs 中有效活性成分

Table 4 Prediction and screening of the effectively active components in VOCs released by *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus* using a network pharmacology method

对应症状 Related diseases		中文名 Chinese name		中文名 Chinese name		中文名 Chinese name		中文名 Chinese name
抑郁 Depression	1	邻伞花烃 *o*-Cymol						
失眠、焦虑 Insomnia, anxiety	1	顺式-对-薄荷二烯醇 *p*-Mentha-2,8-dien-1-ol	9	桧烯 Sabinene	17	驱蛔萜 Ascaridole	25	衣兰烯 Ylangene
	2	萜品油烯 Terpinolene	10	莰烯 Camphene	18	*β*-瑟林烯 *β*-Selinene	26	t-杜松醇 *t*-Cadinol
	3	2,6,10-三甲基十二烷 Farnesane	11	4-蒈烯 4-Carene	19	右旋香芹酮 *d*-Carvone	27	β-水芹烯 *β*-Phellandrene
	4	芳樟醇 Linalool	12	月桂烯 *β*-Myrcene	20	乙酸龙脑酯 Bornyl acetate	28	桃醛 *γ*-Undecalactone
	5	*α*-荜澄茄油萜 *α*-Cubebene	13	长叶烯 Longifolene	21	*d*-柠檬烯 *d*-Limonene	29	环己酮 Cyclohexanone
	6	对薄荷-1,3,8-三烯 1,3,8-*p*-Menthatriene	14	γ-萜品烯 *γ*-Terpinene	22	*α*-古巴烯 *α*-Copaene		
	7	(+)-二氢香芹酮 Dihydrocarvone	15	桉叶油醇 Eucalyptol	23	马鞭草烯酮 Verbenone		
	8	乙酸小茴香酯 Fenchyl acetate	16	α-松油醇 *α*-Terpineol	24	(-)-香芹酮 (-)-Carvone		
失眠、焦虑、抑郁 insomnia, anxiety, depression	1	左旋乙酸冰片酯 (-)-Bornyl acetate	5	石竹烯 Caryophyllene	9	α-水芹烯 *α*-Phellandrene		
	2	(1*R*,5*R*)-rel-香芹醇 *cis*-Carveol	6	异丁香烯 Isocaryophyllene	10	α-律草烯 *α*-Humulene		
	3	香芹酮 Carvone	7	冰片 *endo*-Borneol	11	大牻牛儿烯 Germacrene		
	4	*γ*-杜松烯 *γ*-Cadinene	8	*β*-蒎烯 *β*-Pinene				

注：预测筛选依据 TCMSP 中药系统药理学数据库、Pubchem 有机小分子生物活性数据库、TGSC 香料信息数据库。

Note：Prediction and screening of the effectively active components according to database of TCMSP, PubChem and TGSC.

表 5 碰碰香植株释放的 VOCs 中有效活性成分含量正交试验结果

Table 5 Results of mixed horizontal orthogonal test on the effectively active components in VOCs released by *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus*

处理 Treatment	A 光照条件 Light condition	B 温度 Temperature (℃)	C 湿度 Humidity (%)	D CO_2 浓度 CO_2 concentration (μmol·mol^{-1})	有效活性成分释放量 Effectively active components release（μg·L^{-1}·kg^{-1}）
1	光照 Light	20	40	500	2.46
2	黑暗 Dark	25	60	500	78.03
3	光照 Light	20	60	1 500	6.10
4	黑暗 Dark	25	80	1 500	50.39
5	黑暗 Dark	20	80	2 500	31.77
6	光照 Light	25	40	2 500	21.99
7	光照 Light	30	80	3 500	2.53
8	黑暗 Dark	30	40	3 500	4.69
9	光照 Light	30	60	4 500	3.80
10	黑暗 Dark	20	80	4 500	21.04
11	黑暗 Dark	30	80	500	27.10
12	光照 Light	30	40	1 500	3.06
13	黑暗 Dark	30	60	2 500	7.13
14	光照 Light	25	80	3 500	1.99
15	光照 Light	25	40	4 500	7.10
16	黑暗 Dark	20	40	2 500	4.14
17	黑暗 Dark	20	60	3 500	14.05
18	光照 Light	25	60	500	43.01
Ⅰ	92.04	79.56	43.45	150.60	Ⅰ+Ⅱ+Ⅲ+Ⅳ+Ⅴ=
Ⅱ	238.34	202.51	152.12	59.54	330.38
Ⅲ		48.31	134.82	65.04	
Ⅳ				23.25	
Ⅴ				31.94	
K1	10.23	13.26	7.24	37.65	
K2	26.48	33.75	25.35	19.85	
K3		8.05	22.47	16.26	
K4				5.81	
K5				10.65	
Max	26.48	33.75	25.35	37.65	
Min	10.23	8.05	7.24	5.81	
R	16.26	25.70	18.11	31.84	
因素主次 Primary and secondary factors	D>B>C>A				
最优方案 Optimal scheme	A1/A2	B2	C2	D1	

3 讨论

常见芳香盆栽碰碰香的香气广受人们喜爱(荆小洁等, 2020)，具有改善情绪和睡眠的巨大应用潜力(赵小珍等, 2016; Zhang & Yao, 2019)。但是，针对不同室内的环境条件，碰碰香 VOCs 的释放量可能存在较大变化(李洪远等, 2015)。本研究从碰碰香 VOCs 组分及其释放量变化的角度，探究了温度、湿度、CO_2 浓度及光照条件等典型室内环境对其 VOCs 释放的影响。结果发现碰碰香 VOCs 的释放对 CO_2 浓度和温度较为敏感，而对湿度变化和有无光照的敏感度较低。

大气中 CO_2 浓度的升高会一定程度上抑制碰碰香光合作用速率和 VOCs 的释放。推测高浓度 CO_2 抑制碰碰香 VOCs 释放可能归因于两方面：一方面是萜类物质合成之后需储存于特定的分泌器官中，此类器官的分化和维护的代谢成本较大(Staudt et al., 2001)；另一方面，高浓度 CO_2 提升了光合速率，初级代谢增加，引起次生代谢物的糖基化和氧化，减少了碰碰香萜类化合物的挥发性（Yazaki et al., 2017）。碰碰香 VOCs 中的单萜物质芳樟醇，经 Cyt P450s 氧化为 8-羟代，8-氧代或 8-羧基芳樟醇，从而挥发性降低，以非挥发性物质的形式积累在叶片中（Yazaki et al., 2017）。此外，糖基化和氧化反应可能导致亲水性和分子质量的增加，同时引起叶片干物质密度增加，含水率降低等变化。CO_2 浓度过高甚至可以改变叶绿体的超微结构，造成植物叶片损伤(Velikova et al., 2009)。此外，室内 CO_2 浓度升高也会对情绪和睡眠造成负面影响，显著降低睡眠质量(Zhang et al., 2021)。因此，室内保持较低水平的 CO_2 浓度既有利于碰碰香 VOCs 的稳定释放，亦能维持具有较高人体舒适感的活动环境。

温度是 CO_2 浓度之外另一个影响碰碰香 VOCs 释放的重要环境因素。碰碰香 VOCs 主要成分为萜烯类物质，其可能是由萜烯合酶超家族(the terpene synthase super-family, TPSs)进行催化合成；TPSs 酶将顺式或反式异戊二烯二磷酸酯转化为多种单萜或倍半萜（Muchlinski et al., 2019），然后释放到空气中。碰碰香 VOCs 中β-蒎烯、月桂烯、柠檬烯和β-水芹烯等萜类物质明显依赖于温度水平（Kopaczyk et al., 2020），可能是由于低温或高温直接影响到 TPSs 酶的活性，即随温度上升 VOCs 合成和释放速率逐渐增加；当温度超过一定限度之后，高温降低 TPSs 酶的活性，碰碰香 VOCs 合成和释放速率也随之降低(李洪远等, 2015)，甚至持续的高温可能对 TPSs 酶造成不可逆转的结构损伤。温度还可能通过提高碰碰香萜烯的蒸气压和降低排放途径的阻力，进而提高大多数萜烯物质的排放速率（Llusia et al., 2012）。此外，低温还可能通过影响碰碰香初级代谢，导致次级代谢过程底物不足，从而影响 VOCs 合成这一次级代谢过程（Kopaczyk et al., 2020）。因此，碰碰香植株在实际的应用中，低温或过于闷热的环境均可能通过降低碰碰香 VOCs 的释放，进而降低其园艺干预效果，应尽量保持室内温度稳定适宜，避免高温对碰碰香植物可能造成的损伤。

在本研究中，碰碰香 VOCs 的释放对湿度变化的响应敏感度较低，这可能是由于碰碰香 VOCs 储存在如油腺和腺毛等特殊类型的组织中，而环境中空气相对湿度主要影响碰碰香叶片气孔的开闭(李佳佳等，2020)，而对储存 VOCs 的油腺无影响(Yazaki et al., 2017)。有无光照是碰碰香 VOCs 释放响应不敏感的另外一个环境变化因素。推测这可能是因为其 VOCs 的成分多数为单萜或者倍半萜类物质。而碰碰香叶片内萜类合成酶的活性受光照强度的影响较小(李洪远等, 2015)，有无光照通常不影响碰碰香 VOCs 中倍半萜物质的释放(Leung et al., 2010)，因此在本研究中碰碰香植株 VOCs 的释放对有无光照的响应较小。此外，在黑暗条件下碰碰香 VOCs 中含量最高的成分基本稳定为一种具有镇静催眠作用的物质 d-柠檬烯（Lu et al., 2020），推测在黑暗条件下 d-柠檬烯的合成与释放较为稳定，可能比较适合应用于夜晚室内环境改善睡眠，高效地发挥其对身心健康干预效用。

4 结论

在室内环境中，影响碰碰香植株 VOCs 释放的关键环境因素为 CO_2 浓度和温度。碰碰香植株应用于构建亲生物环境，改善人员身心健康时，最佳的环境条件为黑暗、CO_2 浓度 500 $\mu mol \cdot mol^{-1}$、温度 25 ℃和湿度 60%。此环境条件下碰碰香植株 VOCs 释放量较高且稳定，其释放总量为 86.23 $\mu g \cdot L^{-1} \cdot kg^{-1}$，活性成分含量为 78.03 $\mu g \cdot L^{-1} \cdot kg^{-1}$。此项研究为碰碰香植株应用于室内亲生物构建的环境控制提供了科学依据，同时补充了芳香类植物 VOCs 释放的理论知识。

参考文献：

DAUSSY J, STAUDT M, 2020. Do future climate conditions change volatile organic compound emissions from *Artemisia annua*? Elevated CO_2 and temperature modulate actual VOC emission rate but not its emission capacity[J]. Atmos Environ, 7: 100082.

HOLOPAINEN JK, GERSHENZON J, 2010. Multiple stress factors and the emission of plant VOCs[J]. Trends Plant Sci, 15(3): 176-184.

JASONI R, KANE C, GREEN C, et al., 2018. Altered leaf and root emissions from onion (*Allium cepa* L.) grown under elevated CO_2 conditions[J]. Environ Exp Bot, 51(3): 273-280.

JI CF, XU YZ, LI L, et al., 2019. Monitoring and analyzing of carbon dioxide concentration in classrooms of a university in Xi'an[J]. Build Energ Environ, 38(3): 28-31. [姬长发，徐逸哲，李亮，等，2019. 西安某高校教室内二氧化碳浓度监测分析[J]. 建筑热能通风空调，38(3): 28-31.]

JING XJ, ZHAO YH, LI H, et al., 2020. Effects of VOCs from the stems and leaves of *Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus* and *Galium odoratum* on mouse behavior [J]. J NW For Univ, 35(1): 189-195. [荆小洁，赵玉花，李辉，等，2020.碰碰香，车轴草茎叶挥发物对小白鼠自发行为的影响[J]. 西北林学院学报，35(1): 189-195.]

KOPACZYK JM, WARGUŁA J, JELONEK T, 2020. The variability of terpenes in conifers under developmental and environmental stimuli[J]. Environ Exp Bot, 180: 104197.

LEUNG DYC, WONG P, CHEUNG BKH, et al., 2010. Improved land cover and emission factors for modeling biogenic volatile organic compounds emissions from Hong Kong[J]. Atmos Environ, 44(11): 1456-1468.

LI HY, WANG F, XIONG SG, et al., 2015. Research review on the role and the influential factors of the biogenic volatile organic compounds[J]. J Saf Environ, 15(2): 292-296. [李洪远，王芳，熊善高，等，2015. 植物挥发性有机物的作用与释放影响因素研究进展[J]. 安全与环境学报，15(2): 292-296.]

LI JJ, YANG ZQ, WEI TT, et al., 2020. Effect of high temperature and different air humidity on stomatal characteristics for tomato leaves[J]. Northern Hortic, (6): 23-31. [李佳佳，杨再强，韦婷婷，等，2020. 高温与空气湿度交互对番茄叶片气孔特性的影响[J]. 北方园艺,(6): 23-31.]

LI L, GUENTHER A B, XIE S, et al., 2019. Evaluation of semi-static enclosure technique for rapid surveys of biogenic volatile organic compounds (BVOCs) emission measurements[J]. Atmos Environ. 212: 1-5.

LI YY, 2019. The main composition and affecting factors of aroma volatiles in flowers[J]. Northern Hortic, (6): 184-187. [李莹莹. 2012. 花香挥发物的主要成分及其影响因素[J]. 北方园艺，(6): 184-187.]

LLUSIA J, PEÑUELAS J, SECO R, et al., 2012. Seasonal changes in the daily emission rates of terpenes by *Quercus ilex* and the atmospheric concentrations of terpenes in the natural park of Montseny, NE Spain [J]. J Atmos Chem, 69(3): 215-230.

LU ZG, WANG JZ, QU LN, et al., 2020. Reactive mesoporous silica nanoparticles loaded with limonene for improving physical and mental health of mice at simulated microgravity condition[J]. Bioact mater, 5(4): 1127-1137.

MAZLAN SM, ABAS A, 2021. Systematic review on ecosystem services for indoor environment towards livable human indoor environment[J]. Fresen Environ Bull, 30(4A): 4177-4188.

MUCHLINSKI A, CHEN X, LOVELL JT, et al., 2019. Biosynthesis and emission of stress-induced volatile terpenes in roots and leaves of switchgrass (*Panicum virgatum* L.)[J]. Front

Plant Sci, 10: 1144.
RAJKUMAR RP, 2020. COVID-19 and mental health: A review of the existing literature[J]. Asian J Psychiatr, 52: 102066.
STAUDT M, JOFFRE R, RAMBAL S, et al., 2001. Effect of elevated CO_2 on monoterpene emission of young *Quercus ilex* trees and its relation to structural and ecophysiological parameters[J]. Tree Physiol, 21(7): 437-445.
TAMERIUS JD, PERZANOWSKI MS, ACOSTA LM, et al., 2013. Socioeconomic and outdoor meteorological determinants of indoor temperature and humidity in New York City dwellings[J]. Weather Clim Soc, 5(2): 168-179.
VELIKOVA V, TSONEV T, BARTA C, et al., 2009. BVOC emissions, photosynthetic characteristics and changes in chloroplast ultrastructure of *Platanus orientalis* L. exposed to elevated CO_2 and high temperature[J]. Environ Poll, 157(10): 2629-2637.
WANG Q, REN BB, ZHANG ZX, 2019. Influence mechanism of volatiles release from garden plants[J]. Rural Pract Technol, (8): 87-88. [王茜，任彬彬，张中霞，2019. 园林植物挥发物释放的影响机理[J]. 农村实用技术,(8): 87-88.]
WU K, XIONG KS, SU C, et al., 2021. Mixed horizontal orthogonal test of composite air separation technology[J]. Ind Technol Innov, 8(2): 125-131. [武凯，熊开胜，苏辗，等，2021. 复合式风分技术的混合水平正交试验[J]. 工业技术创新，2021，8(2): 125﹣131.]
YAZAKI K, ARIMURA G, OHNISHI T, 2017. 'Hidden' terpenoids in plants: Their biosynthesis, localization and ecological roles[J]. Plant Cell Physiol, 58(10): 1615-1621.
ZHANG JY, WANG LJ, 2020. Cultivation and management techniques of potted *Plectranthus tomentosa* in Northeast China[J]. Jilin Veg, (2):77. [张玉晶， 王连君，2020. 东北地区盆栽碰碰香的栽培管理技术[J]. 吉林蔬菜，(2)：77.]
ZHANG N, YAO L, 2019. Anxiolytic effect of essential oils and their constituents: A review[J]. J Agr Food Chem, 67(50): 13790-13808.
ZHANG X, LUO G, XIE J, et al., 2021. Associations of bedroom air temperature and CO_2 concentration with subjective perceptions and sleep quality during transition seasons[J]. Indoor Air, 31(4): 1004-1017.
ZHANG X, QI SY, SI QG, et al., 2019. The influence of pretreatment methods on the volatile components in *Plectranthus tomentosa*[J]. J Shenyang Agr Univ, 50(5)：621-627. [张旋，祁姝旖，斯琴格日乐，等，2019.前处理方法对碰碰香挥发性成分的影响[J]. 沈阳农业大学学报，50(5)：621-627.]
ZHAO XZ, LI C, CUI XD, et al., 2016. Chemical composition and antimicrobial activity of *Plectranthus tomentosa* essential oil[J]. Nat Prod Res Dev, 28(3):377﹣381. [赵小珍，李晨，崔晓东，等，2016.绒毛香茶菜精油化学成分的 GC-MS 分析及其抑菌活性鉴定[J]. 天然产物研究与开发，28(3)：377-381.]
ZHONG Y, ZHENG Q, HU YP, et al., 2019. Sedative and hypnotic effects of inhalation of compound anshen essential oil and GC-MS analysis of chemical constituents[J]. Nat Prod Res Dev, 31(9): 1528-1536. [钟钰，郑琴，胡鹏翼，等，2019. 复方安神精油吸入给药的镇静催眠作用及化学成分的 GC-MS 分析[J]. 天然产物研究与开发，31(9): 1528-1536.]